

# Lepkeszárny domborzat optikai meghatározása három dimenzióban

szakdolgozat

Írta: Ratter Kitti  
ELTE TTK, Fizika BSc

Témavezető: Márk Géza István PhD.  
MTA - Műszaki Fizikai és Anyagtudományi  
Kutatóintézet

Belső konzulens: Kürti Jenő DSc.



2010. május 28.

*"Ha nézhetsz, láss is.  
Ha láthatsz, figyelj oda."  
(Tanácsok Könyve)*

# Tartalomjegyzék

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Bevezetés</b>                                                           | <b>3</b>  |
| <b>2. A lepkeszárny szerkezete és optikai funkciója</b>                       | <b>7</b>  |
| 2.1. A lepkék bemutatása . . . . .                                            | 7         |
| 2.2. A szárny szerkezete . . . . .                                            | 8         |
| 2.3. A színek evolúciós funkciója . . . . .                                   | 10        |
| <b>3. Fotonikus nanoszerkezetek</b>                                           | <b>12</b> |
| <b>4. Anyag és módszer</b>                                                    | <b>15</b> |
| 4.1. Az Ezüst szemőc életmódja . . . . .                                      | 15        |
| 4.2. A mérési berendezés . . . . .                                            | 16        |
| 4.3. Az adatok feldolgozása . . . . .                                         | 18        |
| <b>5. Helyfüggő reflexiószög mérés tesztelése próbatesten</b>                 | <b>23</b> |
| 5.1. Tesztmérések a pingponglabdán . . . . .                                  | 23        |
| 5.2. A mért kép modellezése . . . . .                                         | 25        |
| <b>6. Módszer alkalmazása az Ezüst szemőc lepkére</b>                         | <b>28</b> |
| 6.1. Ezüst szemőc mérések . . . . .                                           | 28        |
| 6.2. Ezüst szemőc mérések kiértékelése . . . . .                              | 30        |
| <b>7. A pikkelyek mikroszerkezetének és optikai viselkedésének kapcsolata</b> | <b>33</b> |
| 7.1. Mérés az elektronmikroszkóppal . . . . .                                 | 33        |
| 7.1.1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) . . . . .                            | 33        |
| 7.2. Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) . . . . .                        | 35        |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.3. Transzmissziós elektronmikroszkóppal készített felvételek elemzése . . . . . | 36        |
| <b>8. Eredmények</b>                                                              | <b>45</b> |
| <b>9. Befejezés</b>                                                               | <b>46</b> |
| <b>10.Köszönetnyilvánítás</b>                                                     | <b>47</b> |

# 1. Bevezetés

A tudomány és a technika haladásának feltétele az anyag természetének ismerete. Őseink fejlődése a kőkortól napjainkig a természetben megtalálható anyagok tulajdonságainak megismerésével és azok egyre hatékonyabb és széleskörűbb felhasználásával köthető össze. A történelem előtti civilizációk eszközei az anyag mechanikai tulajdonságait hasznosították. Megtanulták az érceket kibányászni, megmunkálásukkal pedig még jobb tulajdonságokat hoztak ki belőlük. Napjainkban már a legkülönbözőbb mechanikai tulajdonságú mesterséges anyagok állnak a rendelkezésünkre. A XIX., XX. és a XXI. században az anyagok elektromos tulajdonságainak feltérképezésére és azok hasznosítására törekszünk. A félvezetők megismerése és az elektromos tulajdonságok módosítása elhozta a tranzisztor forradalmát, az új ötvözetekkel és a kerámiák segítségével megalkották a szupravezetőket.

A legújabb kihívás a tervezett optikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok létrehozása. Az optikai szálak, amik 'csupán' vezetik a fényt, máris forradalmasították a telekommunikációt. A fizika az optikai számítógépek aktív elemeinek alkotóanyagát látja a fotonikus szerkezetekben. [1]

Mint az utóbbi körülbelül száz év folyamán erre fokozatosan fény derült, a biológiai evolúció már több száz millió éve alkalmaz olyan szerkezeteket, amelyekkel az élőlények különleges módon képesek manipulálni a fényt. Egyre több élőlényről derül ki, hogy valamilyen evolúciós hatás következtében ún. fotonikus nanoszerkezetet fejlesztett ki. A fotonikus nanoszerkezetnek köszönhetően az élőlény kültakarója által visszavert fény frekvenciája, illetve intenzitása függhet a megfigyelés szögétől (irideszcencia), magas fényvisszaverő képességet, ezzel fémes fényt kölcsönözhetnek az élőlénynek, megváltoztathatják a fény polarizációját, stb.. Fotonikus nanoszerkezetnek köszönhetően egyes bogarak arany-, vagy ezüstszerűek, vagy nagyon fényes fehérek [2] [3], illetve nagyon sötét feketék [4], vagy akár a körülményektől függően változtatják a színüket [5]. A páviánoknál, oposszumoknál, mandrilloknál megfigyelhető kék szín [6] is ilyen szerkezetből származik. Pávák [7],

fácánok [8] és kacsák tollán is találhatunk fotonikus nanoszerkezetet [9], de a növényvilágban is akad rá példa. [10]

A biológiai eredetű fotonikus nanoszerkezetek legszebb és leggazdagabb tárházát az ízeltlábúak, elsősorban a bogarak és a lepkék adják. Ezen szerkezetek megértésével és lemásolásával képesek leszünk környezetkímélő (nehézfémmentes, biológiai úton lebomló) festékek, napfényben is jól látható kijelzők [11], gázérzékelők [12] stb. előállítására.

Az élőlények színe [13] kétféle eredetű lehet. A biológiai színeket festékanyagok (pigmentek) hozzák létre. Ezek olyan anyagok, amelyeknek a fényelnyelése, illetve visszaverése hullámhosszfüggő kémiai, elektronszerkezeti okból. A szerkezeti (strukturális) színek [14] a fotonikus nanoszerkezeteken létrejövő fényinterferenciából származnak. A fotonikus nanoszerkezetek olyan kompozit anyagok, melyek jellemző méretskálái a fény hullámhosszával összemérhetőek. A fotonikus nanoszerkezetek speciális esetei az ún. fotonikus kristályok [15] [1], amelyek olyan anyagok, ahol az optikai tulajdonságok (leggyakrabban a törésmutató) a fényhullámhossz méretskáláján térben periodikusan változnak. A fotonikus nanoszerkezetek esetében bonyolultabb, gyakran több méretskálán is rendezett struktúrával állunk szemben. A biológiai rendszerek általában nem olyan tökéletesen rendezettek, mint a szilárdtestfizikában előforduló kristályok, gyakran csak rövidtávú rendet figyelhetünk meg [37]. A lepkék szárnyain található fotonikus nano-szerkezet két fő építőköve a levegő (törésmutató=1) és a kitin (törésmutató = 1,56). Tömbi formában mindkét anyag színtelen, ebben a szerkezetben azonban olyan rendszert alkotnak, hogy az azon szóródó különféle hullámhosszú és irányú elektromágneses hullámok, különböző módon erősítik, vagy oltják ki egymást, ezáltal a különféle irányokba és hullámhosszakon más lesz a visszavert, illetve áteresztett intenzitás.

Mint minden biológiai anyagnak, a lepke szárnyán fellelhető fotonikus nanoszerkezetnek is több funkciója van. Egyrészt el kell rejtenie az állatot a ragadozók elől, másrészt fajtársai számára feltűnőnek kell lennie. Mivel

a lepke hidegvérű, hőháztartását is a színével szabályozza [16]. Továbbá a lepkeszárny nemcsak "optikai eszköz", hanem speciális aerodinamikai és egyéb biológiai követelményeknek is eleget kell tennie.

A lepkeszárny több méretskálán rendezett. Nem csak a szárnyon tetőcserépszerűen elhelyezkedő pikkelyek nanoszerkezetének köszönhetőek a lepkén látott optikai jelenségek. Emellett a pikkelyek egyedi és egymáshoz képesti helyzete is fontos. A nano-, mikro- és makroskálán rendezett szerkezetek együttes kölcsönhatása adja a teljes optikai hatást. Pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) és transzmissziós elektronmikroszkóppal (TEM) jól tanulmányozható a pikkely fotonikus nano- és mikroszerkezete. A dolgozatban elektronmikroszkópos képeken mért adatok alapján vizsgálom a pikkelyek illetve a szárny reflexióját. A nagyobb skálájú szerkezet vizsgálatához más módszerek szükségesek, ezért foglalkozom a pikkelyek elhelyezkedésével a szárnyon és a szárny alakjával. Ez utóbbi módszer lényege, hogy a lepkét a megvilágítás irányát változtatva fényképezzük. Ehhez a munkához egy olyan lepkét választottunk, amely egyedi pikkelyeinek tükörszerű a fényvisszaverése. Így a szárnyáról visszavert fény intenzitásának a megvilágítási szögtől való függése alapján meghatározhatjuk az adott ponthoz tartozó felületi normálist, ebből a lepkeszárny alakját.

Vizsgálatunkhoz az Ezüst szemőc (*Argyrophorus argenteus*, Blanchard, 1852) dél-amerikai lepkét választottuk. A faj Chile és Argentína mérsékeltövi területein honos, kopár hegy- és síkvidéki pusztaságokon él az Andokban és Patagóniában (1. ábra). Mind a hím, mind pedig a nőstény pikkelyzetében fotonikus szerkezet alakult ki, amely feltehetően az ivarok közötti jobb kommunikációt szolgálja.

Munkámat az MTA-MFA Nanoszerkezetek Osztályán végeztem ([www.nanotechnology.hu](http://www.nanotechnology.hu)). A csoport 2002. óta foglalkozik a biológiai eredetű fotonikus nanoszerkezetek kísérleti- és elméleti vizsgálatával. A kutatócsoport, mint az a publikációk és a hivatkozások számán lemérhető, a világ élvonalába tartozik. A fotonikus nanoszerkezetek kutatását széleskörű



1. ábra. Ezüst szemőc lepke hím egyede és élőhelye

magyar- és nemzetközi együttműködésben végzik, együttműködnek többek között a Magyar Természettudományi Múzeummal, a londoni Natural History Museum-mal, a párizsi Université Pierre et Marie Curie-vel és belgiumi FUNDP-vel.

Dolgozatomban a saját munkámat egyes szám első személy használatával, a kutatócsoportunk munkáját többes szám első személlyel, mások munkáját pedig többes szám harmadik személlyel különböztetem meg. A numerikus számításokat és a képfeldolgozást Pv-Wave [17] programozási környezetben végeztem.

## 2. A lepkeszárny szerkezete és optikai funkciója

### 2.1. A lepkék bemutatása

A Lepkék rendjébe (Ordo Lepidoptera) négyszárnyú szárazföldi rovarok tartoznak, teljes átalakulással fejlődnek, a ciklus: pete (tojás) - hernyó - báb - és lepke alakokból áll. A lepke alak, az imágó, örökíti tovább a faj génkészletét [18].

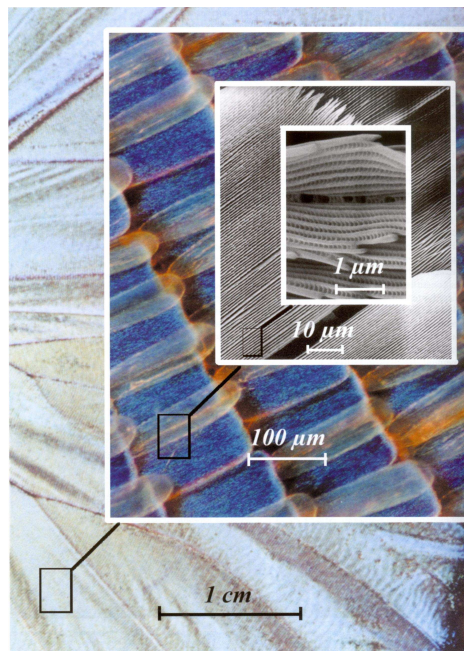
Több mint 20000 fajuk ismert, a világon mindenhol előfordulnak a sarkvidékeket és a növényzet nélküli magashegységeket leszámítva. Növényi eredetű anyagokkal táplálkoznak. Életmódjukat tekintve vannak nappal, szürkületkor és éjszaka repülők is.

Az imágó teste három részből áll: fej tor, potroh. Az ivarérett, repülni képes lepkék mozgatható gömbölyű fején két nagy összetett, vagy a primitívebb fajoknál pontszem helyezkedik el. A szem fölött csápok ízesülnek a fejhez, amelyek hossza bizonyos esetben az állat testének akár többszöröse is lehet, alakjuk rendszerint a hímeken nagyon változatos, a nőstényeken egyszerű. A szájszerv a magasabb rendű lepkék esetén háromízű ajaktapogatókból és a feltekercselt, gyakran igen hosszú pödörnyelvből áll. Alacsonyabb (primitívebb) családokat képviselő fajoknál még fellelhetők a rágók és az állkapcsi tapogatók, vagy azok maradványai. A fej, rövid nyakon keresztül ízesül a dús szőrrel borított torhoz. A tor három szelvényén egy-egy pár láb található. A szárnyak a közép- és utótorhoz csatlakoznak. Egyes fajok ivarérett nőstényei teljesen szárnytalanok is lehetnek, több faj szárnya pedig csökevényes. A legtöbbször szőrös potroh tíz mozgatható szelvénye közül az utolsó három az ivarszervet alkotja. Ezek leírása azon fajok esetén fontos, amelyek meghatározása az ivarszerv alaktani tulajdonságai alapján történik.

## 2.2. A szárny szerkezete

A többnyire háromszög alakú szárnyak külső oldalát rojt szegélyezi. A rojt pikkelyekből jött létre. A külső és a belső szegély mentén nincs rojtozat. A szárnymembrán erezete rendszertanilag nagyon fontos. A legősbibb lepkéknél az első és a hátulsó szárny erezete azonos, a fiatalabb családoknál különböző. Kapcsolókaréjok vagy akasztósörték kötik össze az első és a hátulsó szárnyakat, de az evolúciósan viszonylag fiatal Pillangófélék (Papiliószerűek - Papilionoidea) szárnyai szabadok.

A rendre jellemző szép mintázatot a szárnyakon tetőcserépszerűen elhelyezkedő pikkelyek adják. A pikkely egy nyélen keresztül csatlakozik a szárnymembránra nyíló hüvelyhez. Egyes fajok vagy családok szárnya pikkely nélküli, ebben az esetben a szárny áttetsző. Az éjszakai lepkék hátulsó szárny felszíne egyszerű mintázatú, esetleg teljesen egyszínű, a nappali lepkéké viszont színes, tarka. A fonák többnyire egyszerű színezetű.

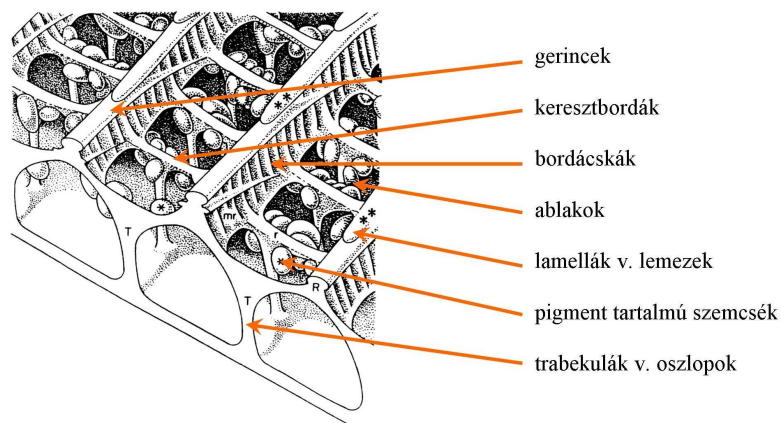


2. ábra. A lepkeszárny és pikkelyei egyre nagyobb felbontásban [20]

A pikkelyek háromdimenziós szerkezete kitinből épül fel, amit levegő tölt ki. A szerkezetben lehetnek még szemcsékbe koncentrálnodva, vagy homogén módon eloszlalva festékanyagok (amelyek akár fluoreszcensek is). A pikkelyek hossza általában 150-200  $\mu m$ , szélességük 30-75  $\mu m$ . Előfordulhatnak más méretű pikkelyek, amelyek funkciója eltérő (pl. rojt, illatszerv). A lepkeszárny méretével a pikkelyek mérete is nő [19]. A pikkely vastagsága 1  $\mu m$  körül mozog.

Az egyedi pikkelyekről készült optikai mikroszkópos vizsgálatokból kiderül, hogy a visszavert fényben tapasztalt élénk szín már mikronos mérettartományban megfigyelhető. A pikkely egyik (hátsó, a szárnymembrán felé eső) oldalát mintázat nélküli lemez határolja, a másik (elülső, szárny felszíni) oldalán hosszanti gerincek és rájuk merőleges keresztbordák rácsot alkotnak. Ez a rács ablakokat határoz meg. (2.-3. ábra)

A felvázolt szerkezeti elemek módosulásai nagyon változatos mintázatokat képezhetnek. A biztosított mechanikai szilárdságon kívül ez a szerkezet felelős a fizikai szín kialakulásáért is.



3. ábra. Általános pikkely szerkezetének vázlata [19]

### 2.3. A színek evolúciós funkciója

A lepkék, bogarak színének három feladatot kell teljesíteni: elrejteni az állatot a ragadozók elől, felhívni rá a figyelmet a fajtársak előtt és a testét melegen tartani. Ha ezeket a feladatokat ábrázoljuk egy háromszögben (4. ábra), az állatnak akkor van a legnagyobb esélye az életben maradásra és a szaporodásra, ha színe a pirossal jelölt területen helyezkedik el. A piros kör speciális helyzete fajfüggő, mert például a trópusi lepkefajoknak nincs szüksége a Nap fényére testük melegen tartásához.



4. ábra. Túlélési-háromszög [20]

A lepkék viselkedésükkel tudják szabályozni, mikor melyik optikai funkció kerüljön előtérbe. A szárny fonákja többnyire rejtőszínű, felszíne pedig jeladásra szolgál. Tehát a lepke szárnyának kitárásával, vagy összecukásával "akaratlagosan" be- és kikapcsolhatja a két funkciót. Hasonló a helyzet a melegen tartásnál, például a lepke a Nap felé tárja a szárnyait, vagy "élével" fordul a Nap felé.



5. ábra. Morpho lepke összezárt és kitárt szárnyakkal



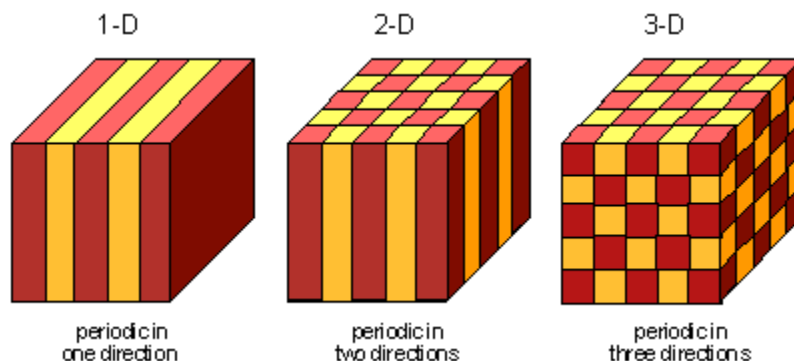
6. ábra. Rejtőzködés (Melyik a lepke, melyik a falevél?)

### 3. Fotonikus nanoszerkezetek

Fotonikus nanoszerkezetekkel találkozhatunk szerte a természetben: ásványvilágban: nemes opál, állatvilágban: halak, madarak, csigák, rovarok kültakaróján, növényvilágban: havasi gyopár.

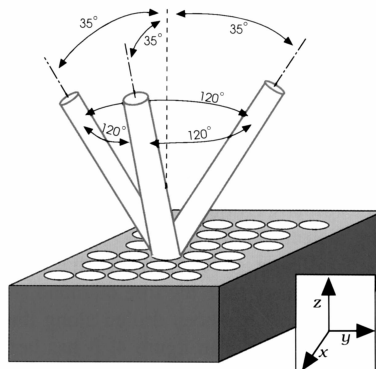
A fotonikus nanoszerkezetek eltérő törésmutatójú anyagokból felépülő kompozit anyagok, melyek lehetnek szintelenek (pl. kitin és levegő). Fotonikus nanoszerkezetek hozzák létre a strukturális színeket.

A fotonikus kristály olyan nanoszerkezet, melyre hosszútávú rend, periodicitás jellemző. Legegyszerűbb formája a Bragg-reflektor mint egydimenziós fotonikus kristály. Míg a Bragg-reflektor régóta ismert, a két- és háromdimenziós fotonikus nanoszerkezetek (7. ábra) kutatása az 1980-as évek végén indult el Yablonovitch [31] és John [32] munkái nyomán.



7. ábra. Egy, két és három dimenzióban periodikus szerkezetek

A szilárdtestek sávszerkezetéből ismert elektronok esetében előforduló tiltott sávhoz hasonló módon értelmezhető az optikai tiltott sáv, mely a fotonikus nanoszerkezetek sajátossága. A fotonikus tiltott sávba eső hullámhosszú fény nem tud terjedni a fotonikus kristályban, hanem visszaverődik róla. 1987-ben Yablonovitch [31] [35] alkalmazta először az elektromágneses hullámokra a szilárdtestfizikából kölcsönzött elemi cella, reciprokrács, Brillouin-zóna- és fénykristály fogalmakat. A fotonikus kristály elemi cellájának mérete nem mérhető össze az atomi kristályszerkezet elemi cel-



8. ábra. Yablonovitch előállítás

lájával, látható fény esetén 100 nm-es nagyságrendbe esik. Megfelelően megválasztva a méreteket és a törésmutatókat elérhető, hogy egy adott energiájú fény ne terjedjen az adott anyagban. Ha ez csak bizonyos, sajátos terjedési irányokra igaz, akkor részleges, ha minden irányra igaz, akkor teljes fotonikus tiltott sávról beszélünk. Ha egy fotonikus kristályban olyan tartományokat akarunk létrehozni, amelyek más tiltott sávot mutatnak valamilyen frekvenciára, azt rácshibák, egyenetlenségek beiktatásával tudjuk megtenni. Így például a "hibákat" sorba fűzve kívánság szerint lehetőség nyílik a fény útjának változtatására.

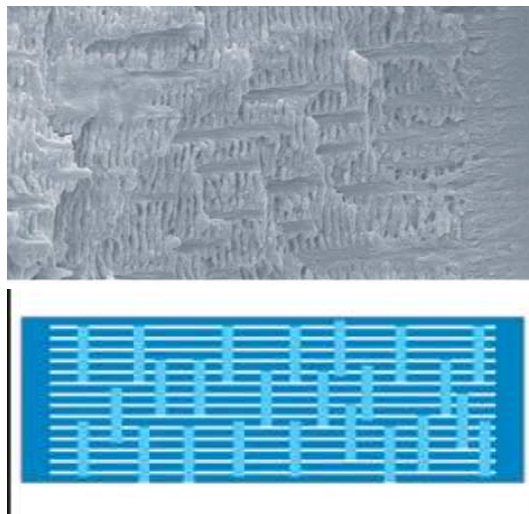
Szintén Yablonovitch volt, aki 1991-ben elkészítette az első fotonikus nanoszerkezetet, a Yablonovitchet [34]. Teflon tömbe fűrt 3 irányból lyukakat, melyek átmérője 6 mm volt. Ez látható a 8. ábrán. A szerkezet tiltott sávja méretéből adódóan nem a látható fény hullámhosszába esett, hanem a mikrohullámok tartományába (13-16 GHz).

Nem kell határozott periodicitással, hosszútávú renddel rendelkeznie egy nanoszerkezetnek ahhoz, hogy képes legyen a ráeső fényt 'manipulálni'. A 9. ábrán a tajvani Trigonophorus rothschildi bogár különböző színű példányai láthatóak, 10. baloldali ábrán pedig az egyik egyed kültakarójáról pásztázó elektronmikroszkóppal készített kép. A bogár kültakaróján található fotonikus nanoszerkezetben kitin és levegő rétegek követik egymást periodiku-

san - a periódus nagyságától függ az állat színe - a rétegek között pedig véletlenszerűen oszlopok helyezkednek el. A modell a 10. ábra alján látható. [36].



9. ábra. A tajvani *Trigonophorus rothschildi* bogár különböző színű példányai



10. ábra. A tajvani *Trigonophorus rothschildi* bogár kültakarójáról készült SEM kép, és a kitinpáncélt alkotó nanoszerkezet modellje

## 4. Anyag és módszer

### 4.1. Az Ezüst szemőc életmódja

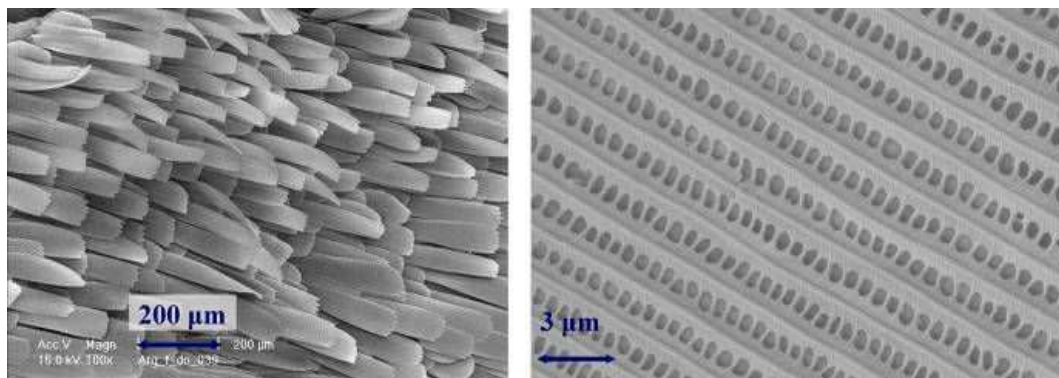
Az Ezüst szemőc (tudományos nevén: *Argyrophorus argenteus*, Blanchard, 1852) (11. ábra) kopár vidékeken él. Hajnalban az éjszakai hideg után nem tud megmozdulni addig, amíg a Nap eléggé fel nem melegíti. Ekkor szárnyait még csukva tartja, így kell elrejtőznie a harmatos tájban a ragadozók elől, ezért szárnyának fonákján a rajzolat rejtőszínű és rajzolatú. Az ezüst szárnyfelületek csak akkor látszanak, ha a lepke mozgásban van. A



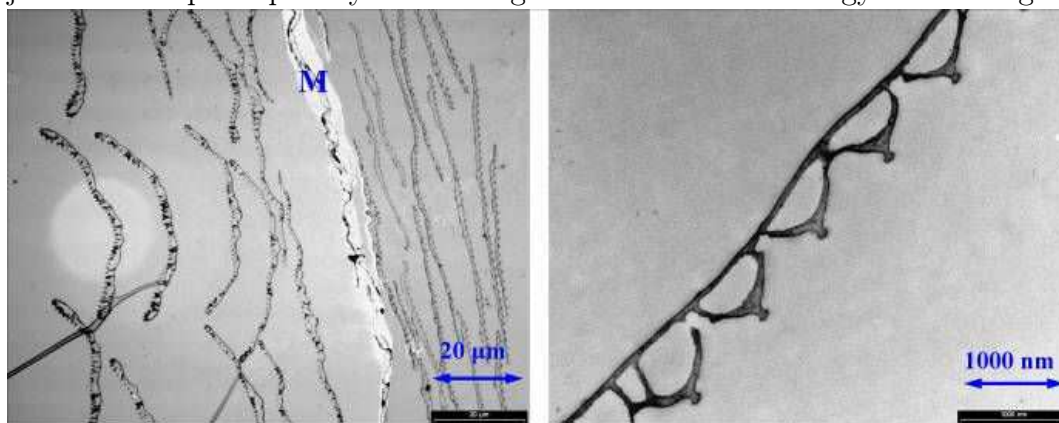
11. ábra. *Argyrophorus Argenteus* pihenő helyzetben

faj nőtényeinek és hímjeinek ezüstös szárnymintázata különböző, ezért ennek feltételezhetően az ivarok felismerésében és egymásra találásában lehet szerepe (1. ábra).

Egy egyeden az elülső és hátulsó szárny pár illetve a szárny fonákja (ventrális oldal) és felszínének (dorzális oldal) rajzolata is más. A szárnymembránt hosszúkás pikkelyek és néhol kitinszőrszálak borítják, amelyek sűrűn és rendezetlenül állnak (12. ábra) A pikkelyek felépítése változatos lehet, függ attól, melyik szárny melyik felén helyezkednek el. Általánosan jellemző rájuk, hogy egyszerűek, a pikkelyen belül nincsen fotonikus nanoszerkezet (13. ábra), és önmagukban a beeső fénynek csak egy kis hányadát verik vissza. A szárnyon 6-8 pikkely rétegződik egymásra rendezetlenül.



12. ábra. Pikkelyek SEM képei, két különböző nagyításban. A bal oldali képen jól látható a pikkelyek tetőcserép szerű elrendeződése a szárnyon, a jobb oldali képen a pikkelyeken levő "gerincek" és "ablakok" figyelhetők meg.



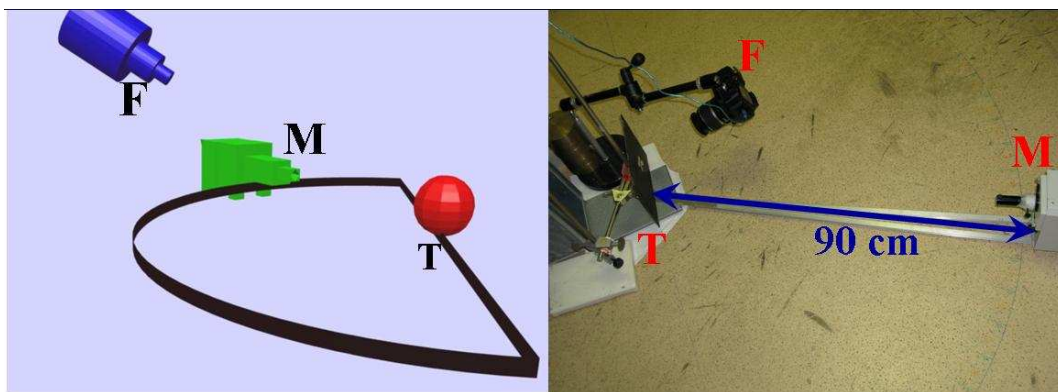
13. ábra. Pikkelyek TEM képei, két különböző nagyításban. A bal oldali képen az M betű jelöli a szárnymembránt, a sötét sávok a pikkelyek keresztmetszeti képei a szárnymembrán egyik és másik oldalán. A jobb oldali képen egy pikkely nanoszerkezete látható.

## 4.2. A mérési berendezés

Olyan fényképsorozatot készítettem, ahol a képek adott pixele mindig a lepke ugyanazon pontjához tartozik. Ehhez szükséges volt, hogy a fényképezőgép és a lepke mozdulatlan maradjon, csak a megvilágítás mozogjon. A padlóra rajzolt félkör középpontjába helyeztük az állványt, amihez egy fém lécen

keresztül csatlakozott a fényforrás. Így mozoghatott a fényforrás a 90 cm sugarú félkörön. Egy másik állványra erősített csipesszel közrefogtuk a fényforrás állványát úgy, hogy a lehető legközelebb legyenek egymáshoz, de ne érjenek össze. Így tudtuk azt elérni, hogy a lepke a kör középpontjának közelében (2 cm távolságra) legyen, de ne mozduljon meg, miközben a fényforrást mozgatjuk. A lepkét a csipesz műanyag borítására szúrtuk, úgy, hogy a tűje párhuzamos legyen a padlóval, és merőleges legyen a padlóra rajztolt félkör átmérőjére. A lepke padlótól mért távolsága 15 cm volt, a fényforrás távolsága a padlótól szintén 15 cm volt, így a lepke a fény maximális intenzitású foltjában helyezkedett el.

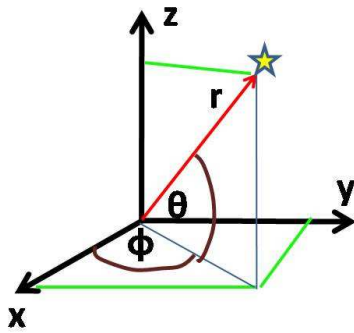
A fényképezőgépet az állványa segítségével a lepkére irányítottuk, olyan távolságra (19 cm) tőle, hogy a visszavert fénysugarak párhuzamosnak tekinthetők legyenek, de még kellően rá tudjunk közelíteni a lepkére. Így a fényképezőgép a fényforrás által kijelölt síkból kiemelve, a félkör felénél,  $\phi = 0^\circ$ -nál állt, talajtól mért távolsága 22,2 cm. Lencséjének optikai tengelye a vízszintessel szöget zárt be,  $27,27^\circ$ -ot. Azért volt szükség a kamera megemelésére és megdöntésére, mert árnyékot vetett volna a lepkére, ha pontosan szembe helyezzük vele. (14. ábra)



14. ábra. A berendezés (M-megvilágító, F-fényképezőgép, L-lepke)

### 4.3. Az adatok feldolgozása

A fényképezett test pontjainak normálisait polárkoordinátákkal paramétereztem úgy, hogy  $\phi$ -t az  $x$  tengelytől mértem,  $\theta$ -t pedig az  $xy$ -síktól. Így a test pontjainak Descartes-koordinátái ( $r = 1$ ):



$$\begin{aligned}x &= \cos\theta \cdot \cos\phi \\y &= \cos\theta \cdot \sin\phi \\z &= \sin\theta\end{aligned}\quad (1)$$

A fényképezőgép koordinátái:

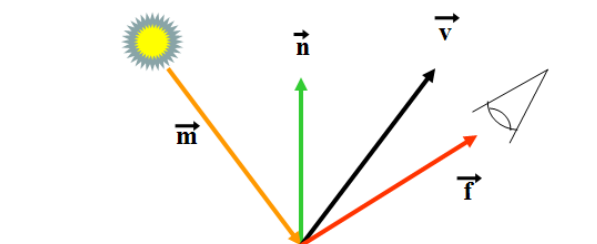
A megvilágító koordinátái:

$$\begin{aligned}\theta_f & & \theta_m &= 0 \\ \phi_f &= 0 & \phi_m & \\ x_f &= \cos\theta_f & x_m &= \cos\phi_m \\ y_f &= 0 & y_m &= \sin\phi_m \\ z_f &= \sin\theta_f & z_m &= 0\end{aligned}\quad (2)$$

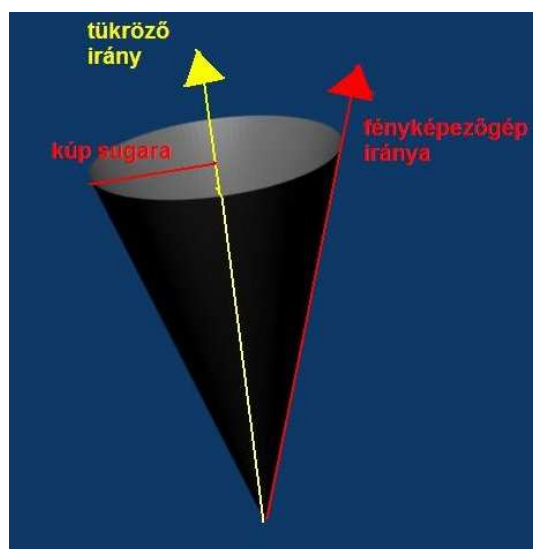
Két feltevéssel kell élnem a fényképek vizsgálatánál:

- a legnagyobb intenzitás iránya a tükröző irány
- a fénysugarak intenzitása attól függ, hogy milyen szöget zárnak be a tükröző iránnyal (16. ábra.

Akkor maximális az intenzitás, ha a kúp sugara minimális, ekkor a kúp nyílásszöge minimális, minimális szögnél a szög cosinusa maximális. Vizsgáljuk a fényképezőgépre és a megvilágítóra mutató vektorok skalárszorzatát! Ennek a maximumát kell megkeresnünk.  $\vec{m}$  a megvilágító vektora,  $\vec{f}$  a

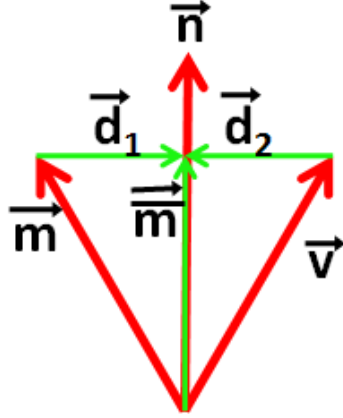


15. ábra. Jelölés:  $\vec{m}$ -megvilágítóra mutató vektor,  $\vec{f}$ -fényképezőgépre mutató vektor,  $\vec{n}$ -test adott pontjának normálvektora,  $\vec{v}$  - visszavert fénysugár irányvektora



16. ábra. Maximális az intenzitás, ha a kúp sugara minimális

fényforrás vektora,  $\vec{n}$  a testen lévő pont helyvektora,  $\vec{d}_1$  és  $\vec{d}_2$  segédvektorok, az  $\vec{m}$  vektor  $\vec{n}$ -re vetített vektora. Ezek segítségével határozom meg a  $\vec{f} \cdot \vec{v}$  skalárszorzatot.



$$|\vec{n}| = |\vec{m}| = |\vec{f}| = |\vec{v}| = 1$$

$$\vec{v} = \vec{m} - \vec{d}_2$$

$$\vec{d}_2 = -\vec{d}_1 = \vec{m} - \vec{m} = \vec{m} - (\vec{n} \cdot \vec{m}) \vec{n}$$

$$\vec{v} = \vec{m} - \vec{d}_2 = 2(\vec{n} \cdot \vec{m}) \vec{n} - \vec{m}$$

$$\vec{f} \cdot \vec{v} = 2(\vec{n} \cdot \vec{m})(\vec{n} \cdot \vec{f}) - \vec{m} \cdot \vec{f} \quad (3)$$

Az 1. 2. és 3. egyenletek felhasználásával rendezés után a  $\vec{f} \cdot \vec{v}$  skalárszorzatra a következő összefüggést kaptam:

$$\begin{aligned} \vec{f} \cdot \vec{v} &= \cos\phi_m [2x(x \cdot x_f + z \cdot z_f) - x_f] + \sin\phi_m [2y(x \cdot x_f + z \cdot z_f)] = \\ &= A \cdot \cos\phi_m + B \cdot \sin\phi_m = R \cdot (\cos\alpha \cdot \cos\phi_m + \sin\alpha \cdot \sin\phi_m) = \\ &= R \cdot \cos(\phi_m - \alpha), \end{aligned} \quad (4)$$

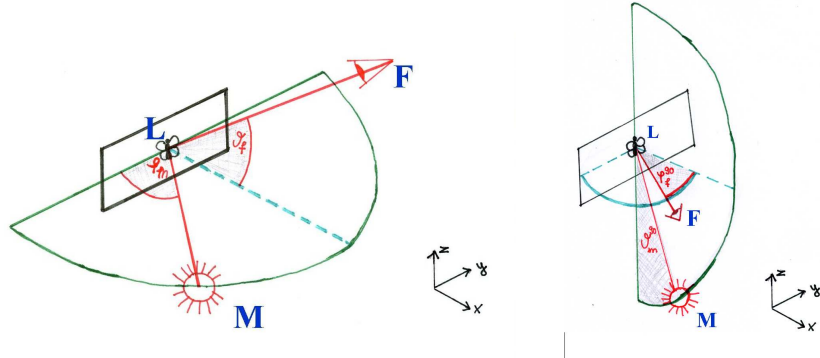
ahol

$$\begin{aligned} A &= 2x(x \cdot x_f + z \cdot z_f) - x_f & B &= 2y(x \cdot x_f + z \cdot z_f) \\ R &= \sqrt{A^2 + B^2} \end{aligned}$$

$\text{tg}\alpha = \frac{B}{A}$  4. alapján a fényképezőgépre és a megvilágítóra mutató vektorok skalárszorzatának akkor van maximuma, ha

$$\phi_m = \alpha = \arctg \frac{B}{A} = \arctg \left( \frac{2y(x \cdot x_f + z \cdot z_f)}{2x(x \cdot x_f + z \cdot z_f) - x_f} \right) \quad (5)$$

Az egyenletben a két ismeretlen paraméter a test egyes pontjainak normálvektoraihoz tartozó  $\theta$  és  $\phi$  szögek. Egy egyenlet alapján nem lehet meghatározni ezeket, szükség van egy második egyenletre, amihez úgy jutottam, hogy a testet tengelye (tűje) körül  $90^\circ$ -kal elforgatva is fotóztam. A számítások szempontjából célszerűbb, ha úgy tekintem, hogy a test pontjainak koordinátái nem változnak, hozzá rögzítem a koordináta-rendszert, így a 'világ'



17. ábra. A kétismeretlenes egyenletrendszer megoldásához két fénykép sorozatot kellett készítenünk. A második sorozatban a testet előző helyzetéhez képest  $90^\circ$ -kal elforgatva fényképezük. A számítások könnyebben kezelhetők, ha azt képzeljük, hogy a test helyzete változatlan, a 'világ' forult el körülötte.

fordul el körülötte (17. ábra). A fényképezőgép és a megvilágítás koordinátái ekkor a következőképpen változnak:

Fényképezőgép:

Megvilágító:

$$\theta_f^{90} = 0$$

$$\theta_m^{90}$$

$$\phi_f^{90}$$

$$\phi_m^{90} = 0$$

$$x_f^{90} = \cos\phi_f^{90}$$

$$x_m^{90} = \cos\theta_m^{90}$$

$$y_f^{90} = -\sin\phi_f^{90}$$

$$y_m^{90} = 0$$

$$z_f^{90} = 0$$

$$z_m^{90} = \sin\theta_m^{90} \quad (6)$$

Az 1. 6. és 3. egyenletek alapján a fényképezőgépre és a megvilágítóra mutató vektorok skalárszorzata elforgatás után a következőképpen alakul:

$$\begin{aligned} \vec{f}^{90} \cdot \vec{v}^{90} &= \cos\theta_m^{90} [2x(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90}) - x_f^{90}] + \sin\theta_m^{90} [2y(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90})] = \\ &= A' \cdot \cos\theta_m^{90} + B' \cdot \sin\theta_m^{90} = R' \cdot (\cos\alpha' \cdot \cos\theta_m^{90} + \sin\alpha' \cdot \sin\theta_m^{90}) = \end{aligned}$$

$$= R' \cdot \cos(\theta_m^{90} - \alpha'), \quad (7)$$

ahol

$$\begin{aligned} A' &= 2x(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90}) - x_f^{90} & B' &= 2y(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90}) \\ R' &= \sqrt{A'^2 + B'^2} & \operatorname{tg} \alpha' &= \frac{B'}{A'} \\ \theta_m^{90} = \alpha' &= \operatorname{arctg} \frac{B'}{A'} = \operatorname{arctg} \left( \frac{2y(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90})}{2x(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90}) - x_f^{90}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Így a megoldandó (numerikusan megoldható) egyenletrendszer  $\theta$ -ra és  $\phi$ -re:

$$\begin{aligned} \phi_m &= \operatorname{arctg} \left( \frac{2y(x \cdot x_f + z \cdot z_f)}{2x(x \cdot x_f + z \cdot z_f) - x_f} \right) \\ \theta_m^{90} &= \operatorname{arctg} \left( \frac{2y(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90})}{2x(x \cdot x_f^{90} + y \cdot y_f^{90}) - x_f^{90}} \right) \\ x &= \cos \theta \cdot \cos \phi \\ y &= \cos \theta \cdot \sin \phi \\ z &= \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

## 5. Helyfüggő reflexiószög mérés tesztelése próbatesten

### 5.1. Tesztmérések a pingponglabdán

A helyfüggő reflexiószög mérés módszerét kipróbáltam egy jól meghatározott alakú testen: pingponglabdán (18. ábra).

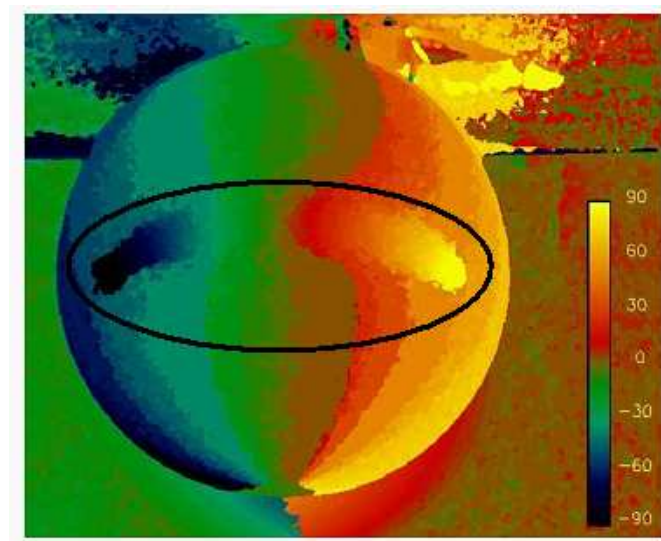


18. ábra. Pingponglabda különböző megvilágítási szögeknél

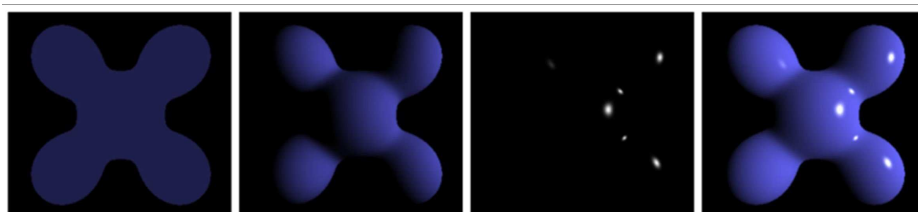
A labdáról készült képeket egy 3 dimenziós tömbbe rendeztem, ahol a képek sorszámához egyértelműen hozzárendelhető a szög, amiben a megvilágító állt a fénykép készültékor. Ezután minden képpontra megkerestem, mekkora szögben állt a fényforrás, amikor az a legfényesebb volt. Az így kapott maximális fényességhez tartozó megvilágítási szögeket ábrázoltam egy hamis-színes képen (19. ábra).

A testek reflexiója lehet tükrös vagy diffúz (20. ábra). Az 19. ábra közepén látható bekeretezett görbe azt a részt mutatja, ahol tükrös a visszaverés. A görbén kívül eső részen diffúz. Diffúz visszaverésnél a visszavert intenzitás csak a megvilágítás és a felület normálisának irányától függ, a megfigyelésétől nem, ez az ún. lamberti-reflexió [21]. A lepkenél tükrös a reflexió, ezért csak az 19. ábrán bekeretezett görbével foglalkozunk.

A görbe nem a pingpong labda széléről indul. Ha megvilágító a  $-90^\circ$ , a fényképezőgép a  $0^\circ$  hosszúsági körön áll, akkor a legfényesebb pont a kettő között félúton,  $-45^\circ$  hosszúsági körön lesz. Ez a pont, a legnagyobb in-



19. ábra. Maximális fényességekhez tartozó megvilágítási szögek hamisszínes képen

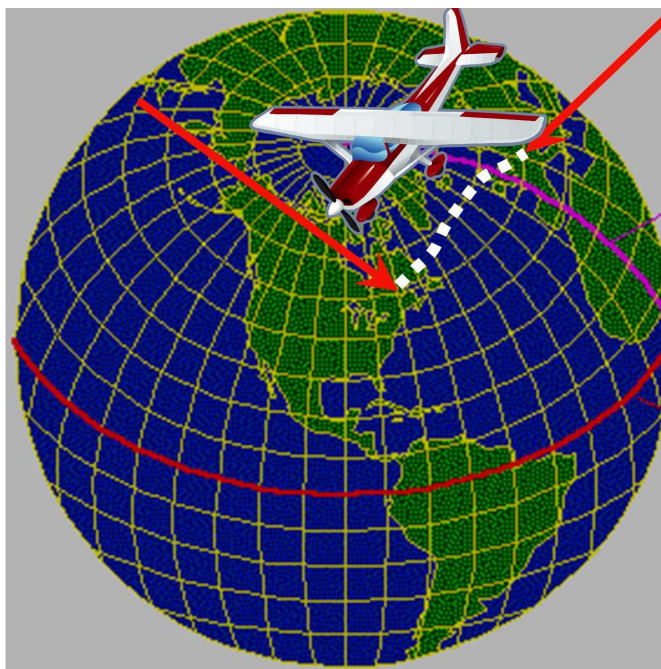


Minden irányból egyenletes megvilágítás esetén a visszaverés + diffúz visszaverés + tükrös visszaverés = 'Phong-reflexió'

20. ábra. Phong-reflexió [22]

tenzitás helye általánosan a megvilágított és fényképezett pontot összekötő legrövidebb görbe felező pontjánál lesz. Csak így teljesülhet az, hogy a beeső és a visszavert fénysugár a beesési merőlegesessel egyforma szöget zár be. Ugyanez az oka annak, hogy a görbe görbe és nem egyenes. A gömbön két pont között a legrövidebb út sosem egyenes. Ha például különböző hosszúsági körön helyezkednek el, akkor a legrövidebb út nem lesz párhuzamos a szélességi körrel, még akkor sem, ha az a két pont esetében azonos. Így a felezőpont nem ott lesz, mint egy egyenesnél lenne, hanem eltolódik egy bizonyos irányba, attól függően, melyik féltéken vagyunk. Például egy Bu-

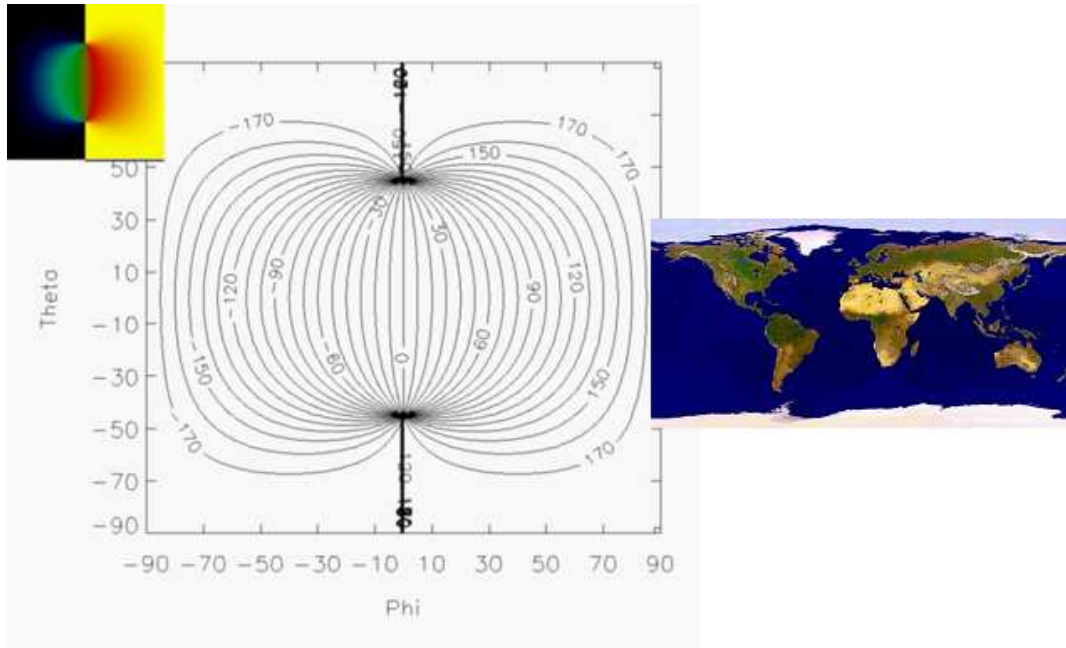
dapestről Montréalba szeretnénk eljutni repülővel a legrövidebb úton, akkor induláskor egy kicsit északra kell tartanunk, mert ott kisebb sugáron haladhatunk (21. ábra).



21. ábra. Legrövidebb repülőút Budapestről Montréalba

## 5.2. A mért kép modellezése

A 4.3. fejezetben leírt képfeldolgozási algoritmus ellenőrzése céljából kiszámítottam a pingponglabda szimulált képeit különféle megvilágítási irányokra és ezekből előállítottam a maximális fényességhez tartozó megvilágítási szögek hamisszínes képét. Ezt összehasonlítva az 19., a mért képekből származtatott ábrával teszteltem az algoritmust. A 4.3. fejezetben elmondottak alapján kiszámoltam a maximális fényességhez tartozó megvilágítási szögeket, úgy hogy a fényképezőgép  $\theta$  szögét 0-nak vettem, és ábrázoltam a test  $\theta$ ,  $\phi$  polárkoordinátáinak függvényében. Ez a kép a gömbalakú Föld síkra vetített térképének felel meg. (22. ábra)



22. ábra. Kiterített labda és Föld

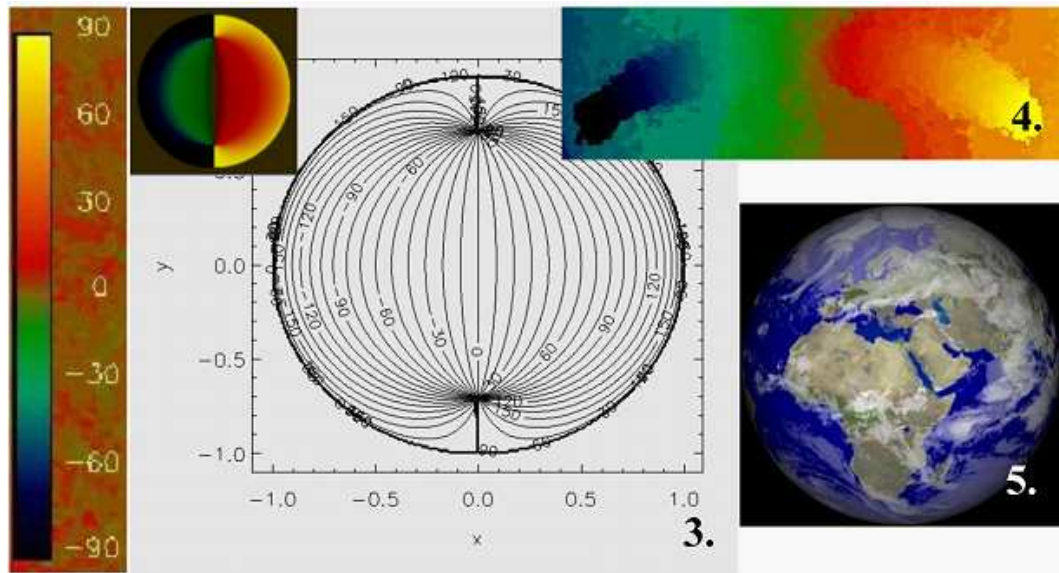
Az így kapott megvilágítási szög értékek a test adott pontjához tartozó  $\theta$ ,  $\phi$  polárkoordináták függvényei. Hogy azt a képet szimulálhassunk, ami a pingponglabdáról készült, az értékeket Descartes-koordinátarendszerbe kell transzformálni és a képsíkra vetíteni. Axonometrikus ábrázolásmód esetében a megfigyelés irányával párhuzamos koordinátát, esetünkben az  $x$  koordinátát elhagyjuk, mert az azonos  $y$ ,  $z$  koordinátájú pontok egybe esnek a képen. Az  $y$  és  $z$  koordinátát pedig a 4.3. fejezetben említett módon kapjuk meg:

$$y = \cos\theta \cdot \sin\phi$$

$$z = \sin\theta$$

Az így kapott kép akkor lenne helyes, ha a fényképezőgép a pingpong labda 'egyenlítőjének' síkjában lenne, de nem ott van, hanem az 'északi szélesség  $27^\circ$ -án áll. Ezért a 3 dimenziós modellt el kell forgatni az  $y$ -tengely körül  $27^\circ$ -kal, és ezután alkalmazni rá az axonometrikus transzformációt. Ez a kép (23/5. ábra) olyan, mint az űrből fényképezett Föld. Most már a két

kép összehasonlítható (23/3. és 4. ábra). Jól látszik, hogy a módszer jó. Használható a lepkére!

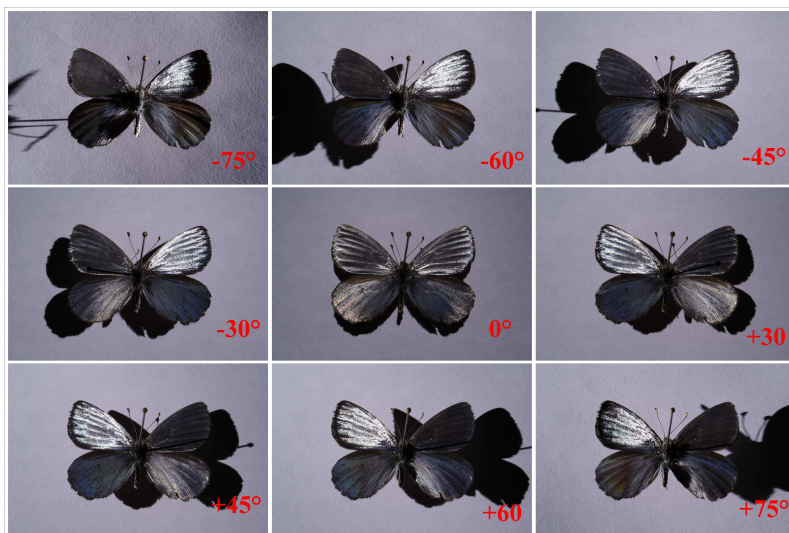


23. ábra. A szimulált kép (3.) olyan, mint az űrből fényképezett Föld (5.) és már összehasonlítható a mért kép tükrös részével (4.)

## 6. Módszer alkalmazása az Ezüst szemőc lepkére

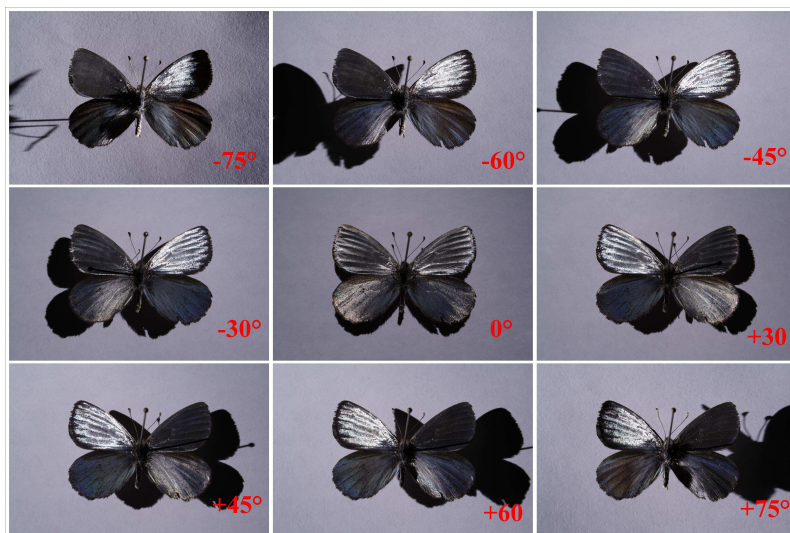
### 6.1. Ezüst szemőc mérések

A lepke nem gömbszimmetrikus, ezért egy képsorozat nem elég, hogy megoldjam a 4.3. fejezetben levezetett két ismeretlenes egyenletrendszer. A lepke tűjét forgatva egy teljes körön át  $90^\circ$ -ként fényképeztem, így négy képsorozat készült (24.-25. ábra).



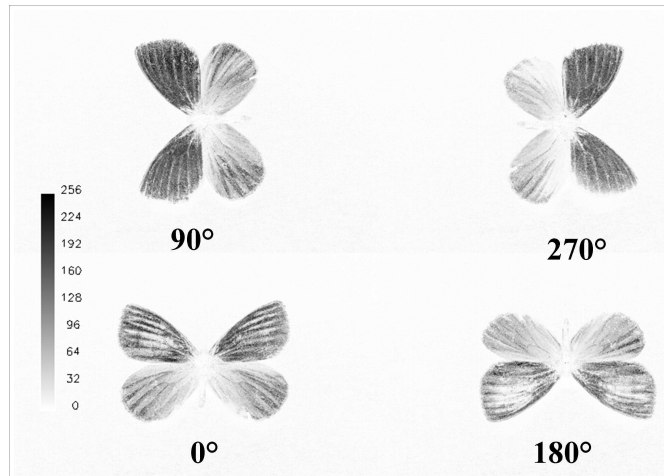
24. ábra. A lepke  $0^\circ$ -os állásban különböző megvilágítási szögekkel

Mindegyik fényképsorozat esetében megkerestem minden képpontra a maximális pixelértéket, ezeket ábrázoltam egy-egy szürkeskálás képen (26. ábra). Ezeken a képeken megfigyelhető, hogy a lepke egy adott helyzetében nem éri el minden pontja a maximális fényességet (255). Egy képpont fényessége akkor alacsony minden megvilágítási szögre, ha az adott ponthoz tartozó pikkely orientációja olyan, hogy az általa visszavert fény iránya egyik esetben sem esik a fényképezőgép irányába vagy a pikkelyhez tartozó normálvektor olyan szöget zár be azzal a síkkal, amiben a megvilágító mozog, hogy az adott helyzetben sosem érkezik rá elegendő fény. Ugyanez az oka annak, hogy a



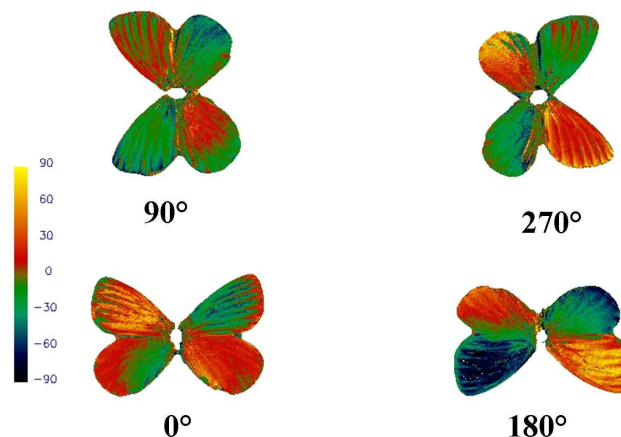
25. ábra. A lepke 270°-os állásban különböző megvilágítási szögekkel

lepke különböző helyzeteiben különböző helyeken lesznek azok a pontok, ahol a fényesség eléri a maximumot.



26. ábra. Maximális fényességek (pixelérték) adott pontokra

Megkerestem a maximális fényességekhez tartozó megvilágítási szögeket. Ezt hamisszínes képeken ábrázoltam (27. ábra). A megvilágítás szöge a lepke szárnyán pontról pontra változik, már a hamisszínes képekből sejthető a szárny domborzata.

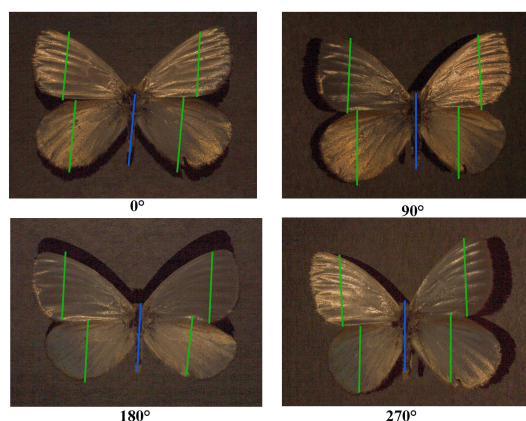


27. ábra. Maximális fényességhez tartozó megvilágítási szögek

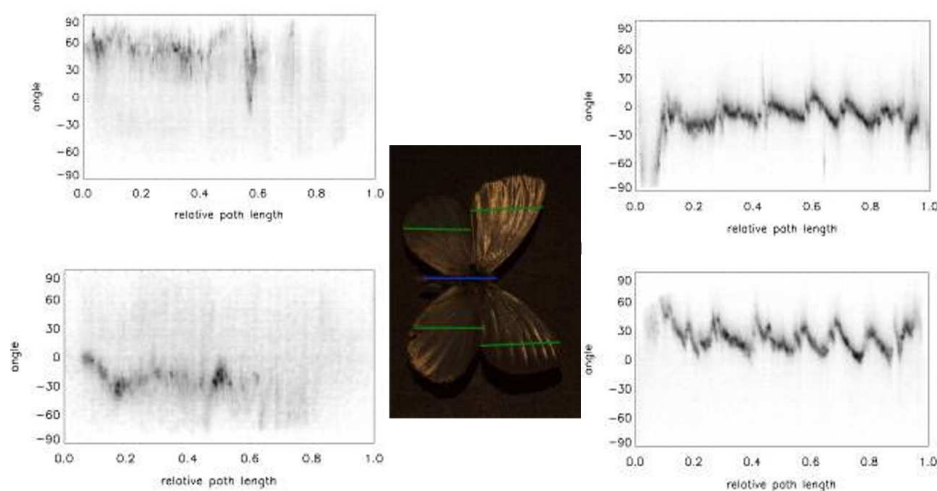
## 6.2. Ezüst szemőc mérések kiértékelése

Annak vizsgálata érdekében, hogy hogyan változik a lepkeszárny egyes pontjainak fényessége a megvilágítási szög függvényében, a lepke szárnyán testével párhuzamos vonalakat húztam (28. ábra), mindegyik szárnyon egyet, helyeztük a szárnyon látható jellegzetes pontok alapján választottam, így a lepke minden állásában a szárnynak azonos pontjaihoz tartoznak. Ezen vonalak mentén megvizsgáltam a pixelek fényességét a vonalmenti relatív ívhossz és a megvilágítási szög függvényében - ld. 29. ábra.

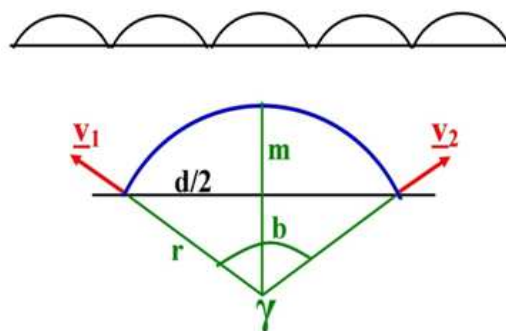
Látható, hogy az mellső szárnyakhoz tartozó görbék határozott periodicitást mutatnak, a hátsó szárnyakhoz tartozó görbén viszont nem figyelhető meg ilyen jellegzetesség. Megnéztem az egyes szárnyakhoz tartozó görbék átlagos maximumait és minimumait, és ebből a 30. ábra alapján számoltam egy átlagos domborzatmagasságot (10. összefüggés). Ezeket az értékeket foglaltam össze a 6.2. táblázatban. Szépen látható az, ami már a maximális fényességhez tartozó megvilágítási szögekből sejthető volt, hogy a lepke mellső szárnyainak domborzata sokkal erőteljesebb, mint a hátsó szárnyaké.



28. ábra. A mérővonalak helyzete a szárnyakon a lepke különböző állásszögeiben, 0 fokos megvilágítási szögnél. A könnyebb összehasonlítás érdekében a fényképeket ezen az ábrán beforgattam úgy, hogy a lepke feje felfelé álljon



29. ábra. A középső kép a lepke 270 fokos helyzetében készült fénykép, 0 fokos megvilágításnál, a kék vonal a lepke testét, a zöld vonalak a mérővonalakat jelölik. A szürkeskálájú képek a szárny pontjainak a mérővonalak mentén mért fényességét mutatják a lepke 270 fokos helyzetében, a vonalmenti relatív ívhossz és a megvilágítási szög függvényében



30. ábra. Lepkeszárny keresztmetszetének modellje, mely alapján az átlagos magasság számolható

|             | Átlagos maximum (fok) | Átlagos minimum (fok) | Különbség (fok) | Átlagos magasság ( $\mu m$ ) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|------------------------------|
| Bal mellső  | 57.1                  | -4.5                  | 61.6            | 148                          |
| Jobb mellső | -6.5                  | -46.3                 | 39.8            | 101                          |
| Bal hátsó   | 16.3                  | 1.2                   | 15.1            | 67                           |
| Jobb hátsó  | 38.1                  | 12.4                  | 25.7            | 49                           |

$$m = \frac{d}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\gamma}{4} \quad (10)$$

## 7. A pikkelyek mikroszerkezetének és optikai viselkedésének kapcsolata

### 7.1. Mérés az elektronmikroszkóppal

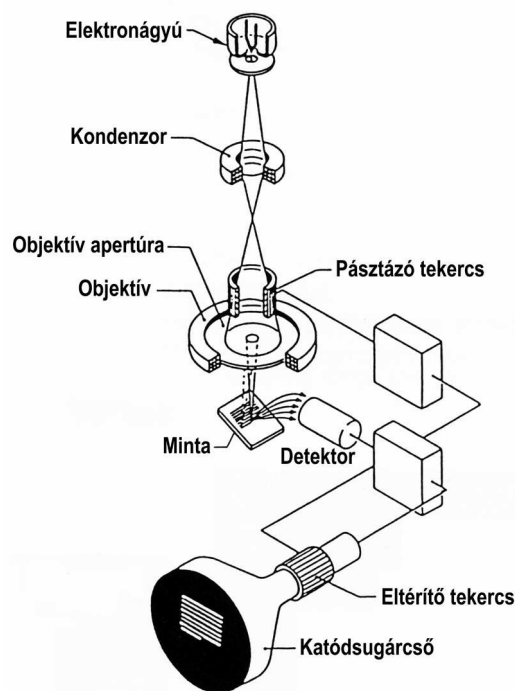
A pikkelyek mikroszerkezete jól tanulmányozható elektronmikroszkóppal. Kisebb felbontás esetén nagy mélységélesség érhető el, ezért jól értelmezhető, tanulmányozható képek készíthetők.

Pásztázó elektronmikroszkóp a minta felületéről ad információt, a transzmissziós elektronmikroszkóppal pedig keresztmetszeti képet kapunk. Tehát egy három dimenziós minta szerkezetének feltárásához a SEM-mel és TEM-mel készült képek együttes vizsgálata szükséges.

#### 7.1.1. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

A SEM egyszerűsített működési elvét szemlélteti a 31. ábra. Mágneses lencsékkel fókuszált elektronsugárral pásztázzuk a minta felületét, és a detektor által befogott visszaszórt (szekunder) elektronok mennyiségével arányos fényességű képet ugyanolyan pásztázással jelenítjük meg egy képernyőn. Pikkelyszerkezet tanulmányozásához legalkalmasabb a szekunder elektronok által adott kontraszt, mert a minta döntésével, nő a szekunder elektronok hozama, így az erőteljes domborzattal rendelkező pikkelyről is éles képet kaphatunk.

Biológia minták elektronmikroszkópos vizsgálata különleges előkészületet igényel [23]. A minta morfológiájának módosítása nélkül kell megakadályozni a szerves anyag bomlását és csökkenteni a nedvesség tartalmát, hogy vákuumrendszerbe helyezhető legyen. Létezik olyan eljárás, amikor a mintának nem kell vákuumban lennie a vizsgálat során. Ez a környezeti pásztázó elektronmikroszkóp [24], mely esetében blendékkel elválasztott többlépcsős vákuumrendszerrel elérhető, hogy a mintakamrában ritkított vízgőz legyen, így akár élő állat is vizsgálható rövid ideig. Lepkeszárny előkészítése a fent leírtaknál

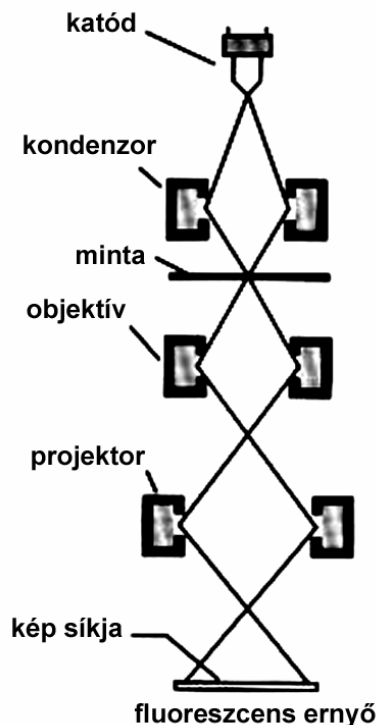


31. ábra. Pásztázó elektronmikroszkóp működési elve

jóval egyszerűbb, mivel száraz anyag. SEM esetében biztosítani kell a mintának elektromos vezetőképességét, hogy ne halmozódjanak fel a pásztázott területen a töltések. A töltés-felhalmozódás hibát okoz a leképzésben. Ennek megakadályozása érdekében a mintát vezető szalag- vagy folyékony ragasztóval rögzítik a földelt mintatartóhoz. Annak érdekében, hogy a minta felülete is vezessen, 30-40 nm vastag aranyréteget visznek fel rá vákuumpárolgatással vagy katódporlasztással. Az aranybevonat elhagyható, ha kicsi elektronhozammal vizsgáljuk a mintát. Ekkor elérhető egy egyensúlyi állapot, amikor a kilépő szekunder elektronok száma megegyezik a becsapódó primer elektronok számával, a mintán tehát nem halmozódik fel töltés. Az első publikáció pásztázó elektronmikroszkópos pikkelyszerkezet vizsgálatról 1942-ből származik [25], a szerző a cikkben már szerkezeti szín képződését tárgyalja.

## 7.2. Transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM)

A TEM működése hasonló az áteresztett fényben használt optikai mikroszkóphoz. A felgyorsított elektronokat kondenzorrendszerrel a minta  $0,5\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$ -nyi foltjára irányítják (32. ábra). Képi üzemmódban (amit a lepke esetében használunk) az objektívlencse képsíkját (diffrakciós üzemmódban a fókuszsíkját) a megfigyelő ernyőre vagy fotólemezre nagyítják. Az elkészített felvételek nagyítása lepkék esetében 3000 és 60000 közé esik.



32. ábra. Transzmissziós elektronmikroszkóp elvi felépítése

A TEM használatával keresztmetszeti képet kaphatunk a pikkelyről. Olyan területeket vizsgálhatunk, melyek a SEM számára láthatatlanok (gerincek alatti részek, ablakokban levő szerkezetek mélyebb részei).

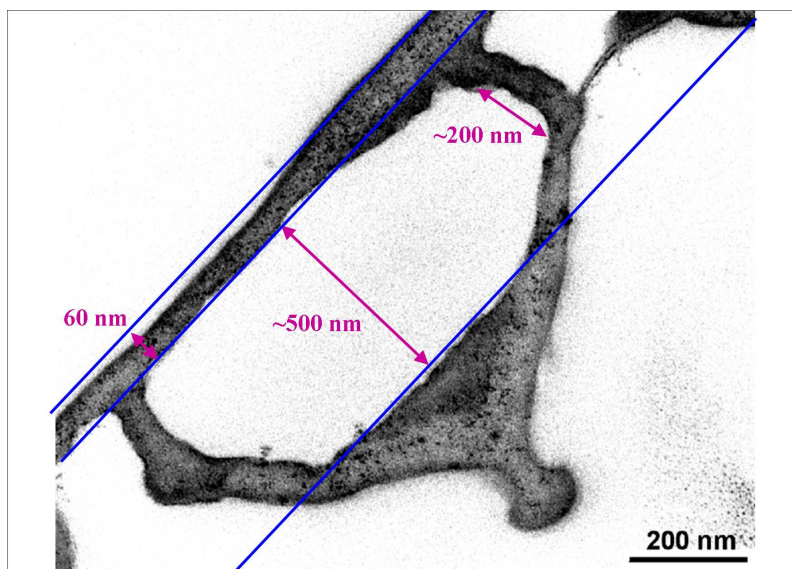
A mintát vizsgálat előtt a néhány  $\text{mm}^2$ -es mintát műgyantába kell ágyazni, amiből gyémántkéssel  $70\text{--}120\text{ nm}$  vastagságú szeletek vághatóak vízfelszíni ráúsztatással. Erre azért van szükség, hogy a párszor  $10\text{ nm}$  vastag minta

felvehető legyen a mintatartóra. A minta vastagsága és minősége szabja meg a gyorsítófeszültséget, amely a minta károsodása nélkül maximum 60 keV lehet.

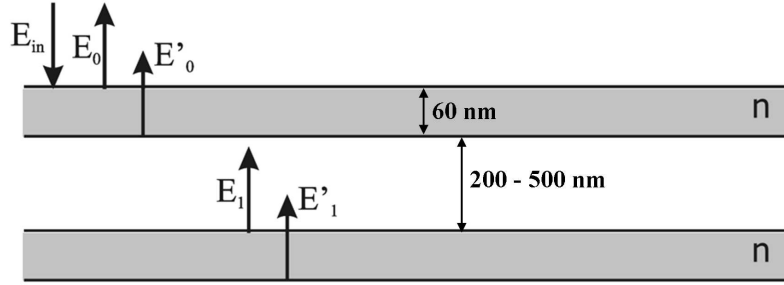
A kép értelmezését megnehezíti az, hogy a vágás szöge nem kontrolálható megfelelően, és kis szögeltérések is sokat módosíthatnak a kapott képen. Fejlesztés alatt áll a TEM-tomográfia [26] módszere, mellyel háromdimenziós képet kaphatunk nanoméretű szerkezetekről. Ezek a módszerek jelenleg még nagyon költségesek, ezért nem használhatóak széleskörűen.

### 7.3. Transzmissziós elektronmikroszkóppal készített felvételek elemzése

Az TEM-mel készült képek alapján vizsgáltam egy illetve két kitinréteg fényvisszaverését. A modell (34. ábra) a 33. ábrán látható TEM felvétel alapján készült. Ezen a képen egyetlen pikkely részlete látható nagy nagyításban.



33. ábra. Transzmissziós elektronmikroszkóppal készült felvétel, amely alapján a modell készült



34. ábra. A modell, ami alapján a számolásokat végeztem. Két 60 nm vastag kitin réteg között 200 és 500 nm között változtatható légréteg

Első esetben csak egy réteg 60 nm vastag kitinre végeztem el a számolást.

Számításaimhoz a Fresnel-képleteket használtam. Ezek az összefüggések különbséget tesznek transzverz mágneses és transzverz elektromos módusok között, de merőleges beesés esetén nincs különbség a két módusban számolt intenzitások között. Csak ezt az esetet vizsgáltam, ekkor a közeghatárról visszavert ( $r$ ) illetve áteresztett ( $t$ ) amplitúdók a következők:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \qquad t = \frac{2 \cdot n_1}{n_1 + n_2}, \qquad (11)$$

ahol  $n_1$  annak a közegnek a törésmutatója, ahonnan a fény érkezik,  $n_2$  ahova érkezik. Esetünkben az egyik közeg levegő (1), a másik kitin (1.56)

A továbbiakban  $t$ -vel és  $r$ -rel jelölöm azokat az amplitúdókat, amikor a fény levegőből érkezik a kitin réteghez,  $t'$ -vel és  $r'$ -vel azt, amikor kitinből érkezik a levegő réteghez.

Ezek alapján egy 60 nm kitin réteg esetén a visszavert intenzitás:

$$I_1 = |E_{in} \cdot (r + t \cdot r' \cdot e^{-ik \cdot 2d_{eff}})|^2, \qquad (12)$$

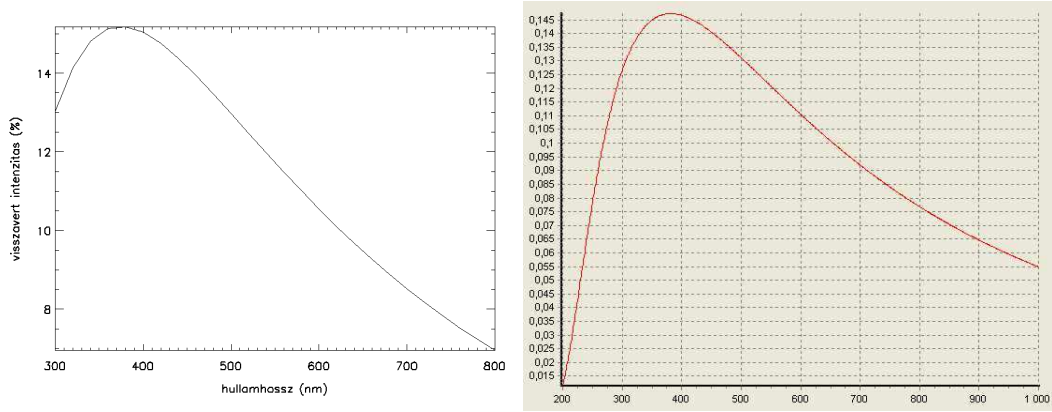
$$E_{in} = 1$$

$$d_{eff} = n \cdot d$$

$$n = 1.56 \text{ (kitin törésmutatója)}$$

$$d = 60 \text{ nm (kitin réteg vastagsága)}$$

Az így számított intenzitás görbe látható a 35. ábrán. Összehasonlításképpen mellette látható reflektált intenzitás a hullámhossz függvényében, ennek a számításánál figyelembe vettük a többszörös szórás is. Látható, hogy a görbék jó közelítéssel egyeznek, tehát nem követünk el hibát azzal, hogy nem vettük figyelembe a többszörös szórás.



35. ábra. Bal: 60 nm vastag kitin réteg által visszavert fény intenzitása a hullámhossz függvényében. Jobb: 60 nm vastag kitin réteg által visszavert fény intenzitása a hullámhossz függvényében figyelembe véve a többszörös szórás is

Második esetben két 60 nm vastag kitiréteg fényvisszaverését vizsgáltam, melyek között 200-tól 500 nm változtatható a légréteg vastagsága ez felel meg az Ezüst szemőc pikkelyén található mintázatnak.

Ebben az esetben az első rétegről visszaverődő amplitúdókhöz még hozzá kell adni a második rétegről visszaverődő amplitúdókat is.

Az első rétegről visszaverődő amplitúdó:

$$E_1^{TOT} = E_{in} \cdot (r + t \cdot r' \cdot e^{-ik \cdot 2d_{eff}}), \quad (13)$$

Az második rétegről visszaverődő amplitúdó számításánál már kicsit bonyolultabb összefüggést kapunk, mert a fázistagban megjelenik a két ki-

tinréteg vastagságát jellemző tag ( $l$ ) illetve a második rétegről visszaverődő amplitúdó már előtte áthaladt az első rétegen, ezért jelenik meg a  $t \cdot t'$  szorzó.

$$E_2^{TOT} = E_{in} \cdot (t \cdot t' \cdot r \cdot e^{-ik \cdot (2d_{eff} - 2l)} + t \cdot t' \cdot t \cdot r' \cdot e^{-ik \cdot (4d_{eff} - 2l)}), \quad (14)$$

A visszaverődő intenzitást a két amplitúdó összegének abszolútérték négyzete adja:

$$I_2 = |E_{in} \cdot (r + t \cdot r' \cdot e^{-ik \cdot 2d_{eff}} + t \cdot t' \cdot r \cdot e^{-ik \cdot (2d_{eff} - 2l)} + t \cdot t' \cdot t \cdot r' \cdot e^{-ik \cdot (4d_{eff} - 2l)})|^2 \quad (14)$$

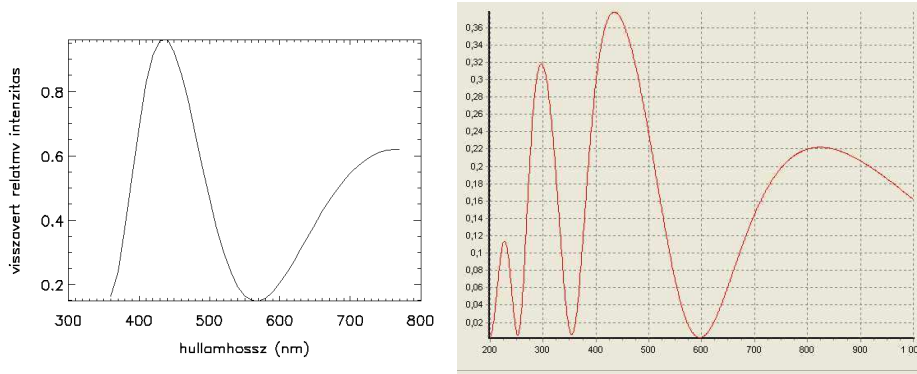
$$E_{in} = 1$$

$$d_{eff} = n \cdot d$$

$n = 1.56$  (kitin törésmutatója)

$d = 60$  nm (kitin réteg vastagsága)

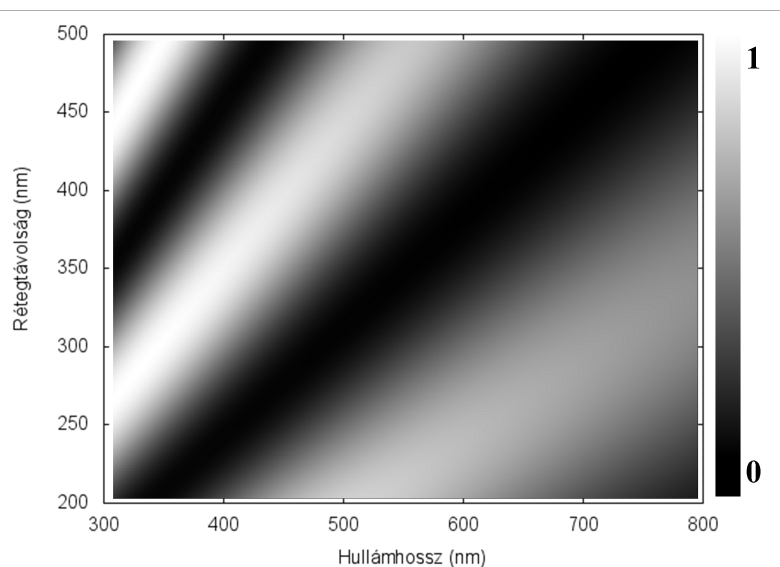
$l = 200 - 500$  nm (légréteg vastagsága)



36. ábra. 60 nm vastag kitiréteget 350 nm vastag légréteg válszt el egymástól. Bal: A szerkezet által visszavert fény relatív intenzitása a hullámhossz függvényében. Jobb: visszavert fény intenzitása a hullámhossz függvényében figyelembe véve a többszörös szórást is

14. összefüggés alapján számított relatív intenzitás hullámhossz függése látható a 36. baloldali ábrán 350 nm vasatag légréteg estén. Összehasonlítható a jobb oldali ábrával, aminek számításánál nem hanyagoltuk el a többszörös szórást. A két görbe jó közelítéssel egyezik a 360 - 770 nm tartományon.

A 37. ábrán a visszavert relatív intenzitás hullámhossz és rétegtávolság függése látható.

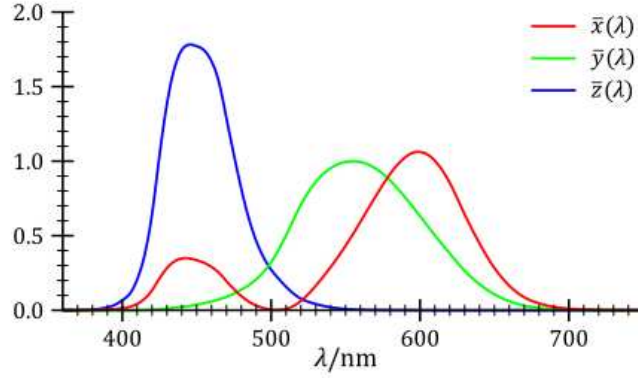


37. ábra. Relatív intenzitás változása hullámhossz (x tengely) és rétegvastagság (y tengely) függvényében

Az eredményből kiszámítható az a szín, amit az emberi szem látni fog.

A szemünkben a színlátásért a csapok felelnek. Egy egészséges szemben háromféle csap található, melyek érzékenységi görbéjének maximuma eltérő hullámhosszaknál van. A három féle csapra jellemző színínger-megfeleltető függvények láthatóak a 38. ábrán.

Ha ismerjük ezeket az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  görbéket, akkor a hullámhossz-intenzitás görbénkből ( $I(\lambda)$ ) 13. összefüggések alapján kiszámíthatóak a látott szín egyes csapokra vonatkozó indexei, a tristimulus értékek [27].



38. ábra. Színínger-megfeleltető függvények [27]

$$X = \int_{400nm}^{800nm} I(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Y = \int_{400nm}^{800nm} I(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda$$

$$Z = \int_{400nm}^{800nm} I(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda$$

A tristimulus értékek:

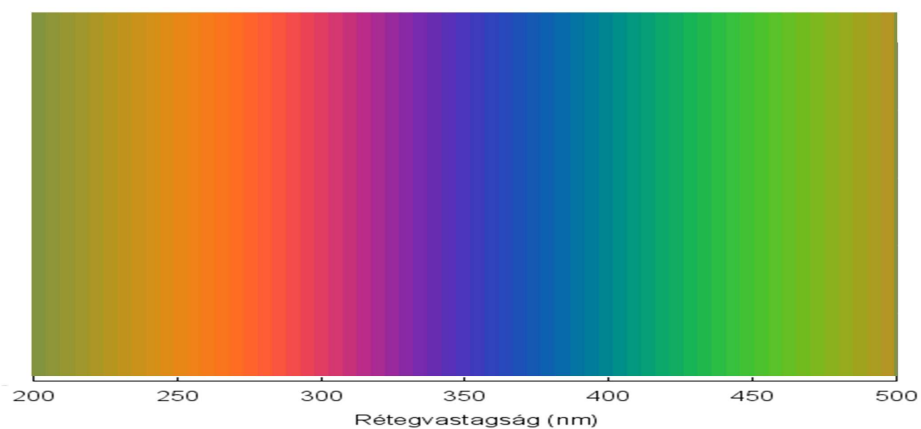
$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

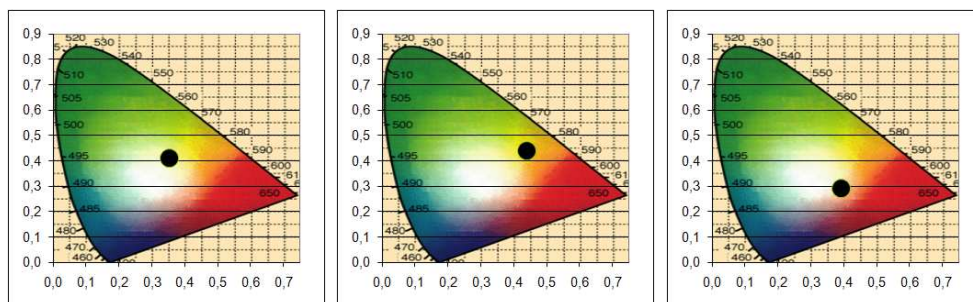
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (13)$$

A fentiek alapján kiszámítottam a látott szín változását a rétegvastagsággal. Ez látható a 39. ábrán.

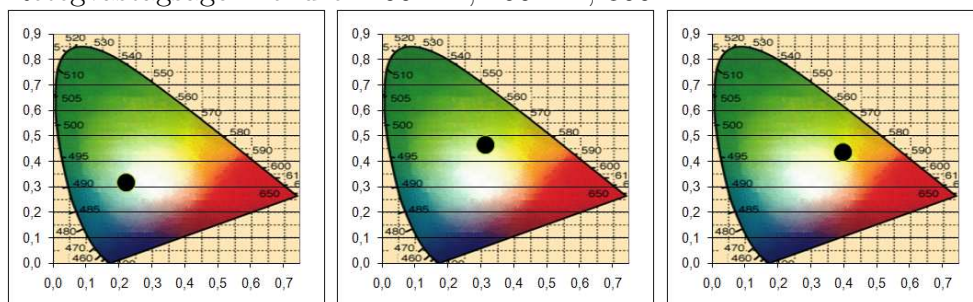
A a tristimulus értékeket szokás ábrázolni kromaticitás diagramon (CIE 1931 színtér, vagy "papucsdiagram"). Ez úgy történik, hogy a  $z$  értékét rögzítik, és a fenmaradó két paraméterrel jellemzhető bármelyik szín. A különböző rétegvastagsághoz tartozó színeket ábrázoltam papucs diagramon, ezek láthatóak a 40. és 41. ábrákon, a fekete folt jelzi az adott színt.



39. ábra. Két kitin réteg által visszavert fény színének változása a rétegek közötti levegő vastagságának változtatásával

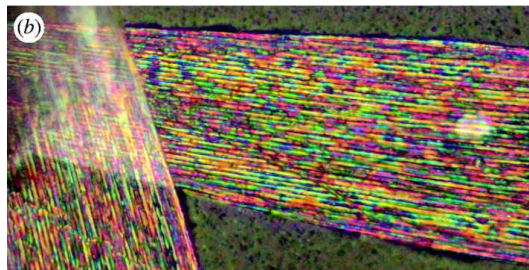


40. ábra. Különböző rétegvastagsághoz tartozó színek papucs diagrammon. Rétegvastagságok rendre: 200 nm, 250 nm, 300nm

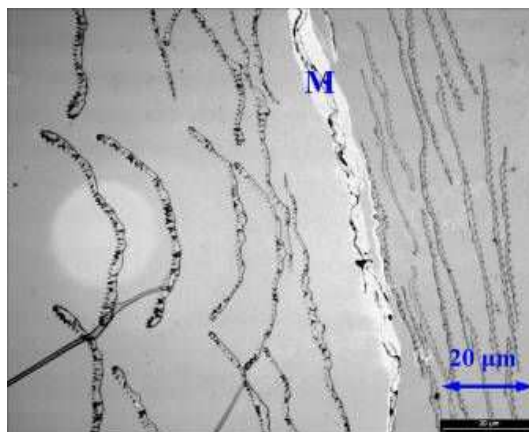


41. ábra. Különböző rétegvastagsághoz tartozó színek papucs diagrammon. Rétegvastagságok rendre: 400 nm, 450 nm, 500nm

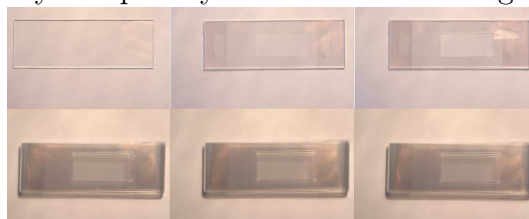
Mivel a pikkelyen mindenféle szín előfordul, a mikroszkopikus méretű szín domének együttes hatása az, hogy makroskálán szürke színt fogunk látni.



42. ábra. Fénymikroszkóppal készült felvétel az Ezüst szemőc lepke egyetlen pikkelyéről. Megfigyelhetők a 'szín-domének' [28]



43. ábra. A szárnyon a pikkelyek rendezetlenül rétegződnek egymásra



44. ábra. Több réteg műanyag fóliát szürkének látunk

A szárnyon több pikkelyréteg található egymás fölött (43. ábra), ezek együttesen a fény jelentős részét visszaverik. Mivel ezek távolsága véletlenszerűen változik és lényegesen nagyobb a fény hullámhosszánál, az egyes

pikkelyek között nincs interferencia hatás. Mivel a pikkelyek szöge is változik, nem egy "tükrot" látunk, hanem egy ezüstösen csillogó felületet. Ezt a jelenséget jól modellezhetjük néhány réteg egymásra helyezett műanyag fóliával – összességében egy ezüstösen csillogó felületet kapunk (44. ábra).

## 8. Eredmények

A 29. ábrán láthatjuk, hogy a két elülső szárnyon a mérővonalak mentén közelítőleg periodikusan változik a maximális fényességhez tartozó megvilágítási szög egy 30 fokos szögtartományban, tehát a felületi normális is közelítőleg periodikusan változik ezen vonalak mentén. Ez azt mutatja, hogy a szárny felülete az erek között domború részekből áll. A két hátsó szárnyon nem figyelhető meg ez a domborulat. A domborulatok átlagos magasságának értékeiből is ugyanez a következtetés vonható le, az átlagos magasság az első szárnyakon közel háromszor akkórának adódott, mint a hátsókon.

Azt is megfigyelhetjük, hogy a fényintenzitás a négy szárnyon más-más szögnél maximális - mint ezt a 27. ábra is jól mutatja. Ebből arra következtethetünk, hogy a négy szárnyon más-más szögben állnak a pikkelyek.

Transzmissziós elektronmikroszkóppal készült képek alapján modellt alkottunk a pikkely szerkezetére. Ez alapján vizsgáltuk a egy illetve két kitinréteg fényvisszaverését a hullámhossz függvényében. Az utóbbi eset felel meg a lepke egyedi pikkelyének. Meghatároztuk az emberi szem által látott színt a kitinrétegek közötti vastagság függvényében. A számítások eredményei megfelelnek a fénymikroszkópos megfigyeléseknek, hogy az egyedi pikkelyeken 'szín-domének' láthatók [28].

## 9. Befejezés

A helyfüggő reflexiószőg mérés módszer segítségével vizsgáltuk egy lepke (Ezüst szemőc, *Argyrophorus argenteus* Blanchard, 1852) pikkelyeinek irányát. Megállapítottuk, hogy a módszer alkalmas a szárny domborzatának feltérképezésére. A lepke különböző elforgatott helyzetében készült fényképsorozatok együttes értékelésével lehetőség nyílik a szárny egyes pontjai térbeli irányának meghatározására, mint azt egy ismert alakú test (pingponglabda) esetében megmutattuk. Megállapíthatjuk, hogy az Ezüst szemőc lepke fémes ezüstös színét a nano- mikro- és makroskálájú szerkezet összjátéka hozza létre. Ahogy a transzmissziós elektronmikroszkópos képen (13. ábra) látható, a szerkezet legkisebb skálájú építőeleme egy 60 nm vastagságú kitin réteg. Ám ahogy a kisebb nagyítású TEM képen látható, a pikkelyek görbültek és a szárnyon több pikkely réteg helyezkedik el, amelyek egymással nem tökéletesen párhuzamosak. Ahogy a helyfüggő reflexiószőg mérés eredményeim megmutatták (makroszerkezet: 27. és 29. ábra), az elülső szárnyon az erek között egy periodikus domborzat figyelhető meg, amely kb. 30 fokos szögben periodikusan változtatja a visszavert fény irányát. Ez a makroszerkezet azt eredményezi, hogy a fémes csillogás nagyobb szögtartományban látható a lepkén, amely hozzájárul az állat rejtőzködési viselkedésének sikerességéhez a harmatos környezetben, ezáltal szelekciós előnyt biztosít a számára. A biológiai eredetű fotonikus szerkezetek vizsgálatában széleskörűen alkalmazott elektronmikroszkópiás módszerek ugyan kiválóan alkalmasak ezen rendszerek nano- és mikroszerkezetének tanulmányozására, de az élőlények optikai tulajdonságait a makroskálájú szerkezet is lényegesen befolyásolja. A helyfüggő reflexiószőg mérés módszerünkkel ezt a hiányzó információt kapjuk meg, hozzájárulva ezáltal a biológiai eredetű fotonikus szerkezetek megértéséhez, amely elengedhetetlen a bioinspirált anyagok, és a makroszkopikus méretű fotonikus eszközök létrehozásához. A bioinspirált multiskálájú fotonikus szerkezetek fontos alkalmazása például a bankjegyek hamisítás elleni védelme [29], ugyanis a bankjegyeken legalább három szintű védelmet szükséges használni.

## 10. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm szüleimnek, hogy tanulhatok és hogy mindenben támogatnak.

Köszönöm Prof. Dr. Biró László Péternek, az MTA MFA Nanoszerkezetek Osztálya vezetőjének a lehetőséget, hogy részt vehettem a kutatócsoport és az MTA-MFA munkájában.

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Márk Géza Istvánnak a türelmét és mindent, amit tanulhattam tőle, Dr. Kertész Krisztiánnak, hogy bármikor számíthattam segítségére a munkám során, Dr. Bálint Zsoltnak, a Magyar Természettudományi Múzeum kurátorának, hogy rendelkezésemre bocsátotta az Ezüst szemőc lepke példányt a mérések céljára. Köszönöm Dr. Vértesy Zofiának, Horváth Enikőnek és Neumann Péternek (MTA MFA) az elektronmikroszkópia területén nyújtott segítségüket, Tamáska Istvánnak a programot, amivel ellenőriztem számításaim helyességét.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm barátaimnak, különösen Daninak és Andrásnak önzetlen segítségét.

## Hivatkozások

- [1] John D. Joannopoulos et al: Photonic Crystals, Molding the Flow of Light, Princeton University Press (Princeton, Oxford, 2008)
- [2] P.Vukusic, B. Hallam, J. Noyes, Science 315, 348 (2007)
- [3] D. G. Stavenga, S. Stowe, K. Siebke, J. Zeil, K. Arikawa, Proc. R. Soc. Lond. B 271, 595 (2004)
- [4] P. Vukusic, R. J. Wooton, J. R. Sambles, Proc. R. Soc. Lond. B 271, 595 (2004)
- [5] J. P. Vigneron, J. M. Pasteels, D. M. Windsor, Z. Vértessy, M. Rassart, T. Seldrum, J. Dumont, O. Deparis, V. Lousse, L.P. Biró, D. Ertz, V. Welch, Phys. Rev. E 76, 031907-1 (2007)
- [6] R. O. Prum, R. H. Torres, The Journal of Experimental Biology 207, 2157 (2004)
- [7] H. Durrer H. Verhandle. Naturf. Ges. Basel, 73, 204 (1962)
- [8] W. J. Schmidt, H. Ruska, Z. Zellforsch., 57, 1 (1962)
- [9] E. Rutschke Z. Zellforsch., 73, 432 (1966)
- [10] J. P. Vigneron, M. Rassart, Z. Vértessy, K. Kertész, M. Sarrazin, L. P. Biró, D. Ertz, V. Lousse, Phys. Rev. E 71, 011906-1 (2005)
- [11] K. Kertész, Zs. Bálint, Z. Vértessy, G. I. Márk, V. Lousse, J. P. Vigneron, M. Rassart, L. P. Biró, Phys. Rev. E 74, 021922-1 (2006)
- [12] L. P. Biró, K. Kertész, Z. Vértessy, Zs. Bálint, The Nature of Light: Light in Nature II. 7057, Proc. of SPIE, edited by Creath, K. 705706-1. (2008)
- [13] Zs. Rajkovits, J. Illy, Fizikai Szemle 51 76 (2001)
- [14] L. P. Biró, Fizikai Szemle 53 385 (2003)

- [15] G. I. Márk, Fizikai Szemle 57 116 (2007)
- [16] L. P. Biró, Zs. Bálint, K. Kertész, Z. Vértesy, G. I. Márk, Z. E. Horváth, J. Balázs, D. Méhn, I. Kiricsi, V. Lousse, et al, Phys. Rev. E, 67, 021907 (2003)
- [17] <http://www.visual-neruics.com/>
- [18] Lepidoptera, Moths and Butterflies Volume 1, Edited by N. P. Kristensen, Walter de Gruyter (1999)
- [19] Lepidoptera, Moths and Butterflies Volume 2, Edited by N. P. Kristensen, Walter de Gruyter (2003)
- [20] Serge Berthier: Iridescences, les couleurs physiques des insectes Springer (2003)
- [21] H. Lambert Photometria sive de gradibus luminis, colorum umbrae (Eberhard Klett, (1760)
- [22] <http://en.wikipedia.org/wiki/Phongshading>
- [23] I. Pozsgai , A pásztázó elektronmikroszkópia és az elektronsugaras mikroanalízis alapjai. ELTE Eötvös Kiadó, (1995)
- [24] An Introduction to ESEM, Philips Electron Optics, Robert Johnson Associates, (1996)
- [25] Anderson T. F., Richards A. G., An Electron Microscope Study of Some Structural Colors of Insects, Journal of Applied Physics 13, 748 (1942)
- [26] Argyros A., Manos S., Large M. C. J., McKenzie D. R., Cox G. C., Dwyer D. M., Electron tomography and computer visualisation of a three-dimensional photonic crystal in a butterfly wing-scale, Micron 33, 483 (2002)
- [27] <http://en.wikipedia.org/wiki/CIE1931colorspace>

- [28] P Vukusic, R Kelly and I Hooper, A biological sub-micron thickness optical broadband reflector characterized using both light and microwaves, *Interface*, 6, S193 (2009)
- [29] S. Berthier, J. Boulenguez, Zs. Bálint, *Applied Physics A*, 86, 123 (2007)
- [30] [www.nanotechnology.hu](http://www.nanotechnology.hu)
- [31] Yablonovitch E., Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059 (1987)
- [32] John S., Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486 (1987)
- [33] Brillouin Léon: Wave propagation in periodic structures, Dover Publications, (1953)
- [34] Yablonovitch E., Gmitter T. J., Leung K. M., Photonic band structure: The facecentered- cubic case employing nonspherical atoms, *Phys. Rev. Lett.* 67, 2295 (1991)
- [35] Yablonovitch E., Photonic band-gap crystals, *J. Phys.: Condens. Matter* 5, 2443 (1993)
- [36] L. P. Biró,, K. Kertész, E. Horváth, G. I. Márk, G. Molnár, Z. Vértessy, J.-F. Tsai, A. Kun, Zs. Bálint and J. P. Vigneron, Bioinspired artificial photonic nanoarchitecture using the elytron of the beetle *Trigonophorus rothschildi varians* as a blueprint, *Interface* (2009)
- [37] G. I. Márk, Z. Vértessy, K. Kertész, Z. Bálint, L. P. Biró, Order-disorder effects in structure and color relation of photonic-crystal-type nanostructures in butterfly wing scales, *Phys. Rev. E* 80, 051903 (2009)